

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平4-297023

(43) 公開日 平成4年(1992)10月21日

(51) Int.Cl. ⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 L 21/205		7739-4M		
33/00	C	8934-4M		
// H 0 1 S 3/18		9170-4M		

審査請求 未請求 請求項の数4(全 7 頁)

(21) 出願番号	特願平3-89840	(71) 出願人	000226057 日亜化学工業株式会社 徳島県阿南市上中町岡491番地100
(22) 出願日	平成3年(1991)3月27日	(72) 発明者	中村 修二 徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化学工業株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願平3-32259	(74) 代理人	弁理士 豊栖 康弘
(32) 優先日	平3(1991)1月31日		
(33) 優先権主張国	日本 (J P)		

(54) 【発明の名称】 窒化ガリウム系化合物半導体の結晶成長方法

(57) 【要約】

【目的】 窒化ガリウム系化合物半導体の結晶性および表面モフォロジーを改善し、さらに窒化ガリウム系化合物半導体を安定して、歩留よく成長する。

【構成】 一般式が、 $Ga_xAl_{1-x}N$ (但し x は $0 < x \leq 1$ の範囲である) で示されるバッファ層の表面に、窒化ガリウム系化合物半導体の結晶を成長させる。

【効果】 バッファ層の表面に成長される窒化ガリウム系化合物半導体の結晶性を飛躍的に向上できる。

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 反応容器内に反応ガスを供給し、低温で成長させるバッファ層の上に、高温で成長させる窒化ガリウム系化合物半導体の結晶を成長させる方法において、前記バッファ層の一般式が、 $Ga_{1-x}Al_xN$ （但し x は $0 < x \leq 1$ の範囲である）で示されることを特徴とする窒化ガリウム系化合物半導体の結晶成長方法。

【請求項2】 基板の上に、一般式が $Ga_{1-x}Al_xN$ （但し x は $0 < x \leq 1$ の範囲である。）で示されるバッファ層を成長させ、このバッファ層の上に窒化ガリウム系化合物半導体を成長させる請求項1記載の窒化ガリウム系化合物半導体の結晶成長方法。

【請求項3】 窒化ガリウム系化合物半導体の上に、一般式が $Ga_{1-x}Al_xN$ （但し x は $0 < x \leq 1$ の範囲である。）で示されるバッファ層を成長させ、さらにこのバッファ層の上に窒化ガリウム系化合物半導体を成長させる請求項1記載の窒化ガリウム系化合物半導体の結晶成長方法。

【請求項4】 前記バッファ層の厚さが $0.002\mu m$ 以上、 $0.5\mu m$ 以下であることを特徴とする請求項1記載の窒化ガリウム系化合物半導体の結晶成長方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明はサファイア等の基板の上に、窒化ガリウム系化合物半導体の結晶を成長させる方法に関し、特に結晶性の優れた窒化ガリウム系半導体化合物のエピタキシャル層の成長方法に関する。

【0002】

【従来の技術及びその問題点】 最近、窒化ガリウム系化合物半導体、例えば、一般式が $Ga_{1-x}Al_xN$ （但し、 x は $0 \leq x \leq 1$ の範囲にある）の青色発光デバイスが注目されている。窒化ガリウム系化合物半導体の結晶を成長させる方法として、有機金属化合物気相成長法（以下MOCVD法という。）がよく知られている。この方法はサファイア基板を設置した反応容器内に、反応ガスとして有機金属化合物ガスを供給し、結晶成長温度をおよそ $900^\circ C \sim 1100^\circ C$ の高温で保持して、基板上に化合物半導体結晶のエピタキシャル層を成長させる方法である。例えば GaN エピタキシャル層を成長させる場合には、III族ガスとしてトリメチルガリウムと、V族ガスとしてアンモニアガスとを使用する。

【0003】 このようにして成長させた窒化ガリウム系化合物半導体のエピタキシャル層を発光デバイスとして用いるためには、第一に結晶性を向上させることが不可欠である。

【0004】 また、MOCVD法を用いてサファイア基板上に直接成長された、例えば GaN 層の表面は、六角ピラミッド状、ないしは六角柱状の成長パターンとなって無数の凹凸ができ、その表面モフォロジーが極めて悪くなる欠点がある。表面に無数の凹凸がある表面モフォ

2

ロジーの極めて悪い半導体の結晶層を使用して青色発光デバイスを作るとは、非常に歩留が悪く、ほとんど不可能であった。

【0005】 このような問題を解決するために、窒化ガリウム系化合物半導体の結晶を成長させる前に、基板上に AlN のバッファ層を成長させる方法が提案されている {Appl. Phys. Lett. 48, (1986), 353, (アプライド フィジックス レターズ 48 巻、1986年、353 頁、および特開平2-229476号公報)}。この方法は、サファイア基板上に、成長温度 $400 \sim 900^\circ C$ の低温で、膜厚が $100 \sim 500$ オングストロームの AlN のバッファ層を設けるものである。この方法はバッファ層である AlN 層上に GaN を成長させることによって、 GaN 半導体層の結晶性および表面モフォロジーを改善できる特徴がある。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】 しかしながら前記方法は、バッファ層の成長条件が厳しく制限され、しかも膜厚を $100 \sim 500$ オングストロームと非常に薄い範囲に厳密に設定する必要があるため、そのバッファ層を、大面積のサファイア基板、例えば約 $50mm$ 径のサファイア基板上全面に、均一に一定の膜厚で形成することが困難である。したがって、そのバッファ層の上に形成する窒化ガリウム系化合物半導体の結晶性および表面モフォロジーを歩留よく改善することが困難であり、またその結晶性は未だ実用的な発光ダイオード、半導体レーザー等を作るまでには至っておらず、さらなる結晶性の向上が必要であった。

【0007】 本発明はこのような事情を鑑みてなされたものであり、その目的とするところはバッファ層上に成長させる窒化ガリウム系化合物半導体の結晶性および表面モフォロジーが実用レベルにまで改善でき、さらに窒化ガリウム系化合物半導体が安定して、歩留よく成長できるための、成長方法を提供するものである。

【0008】

【課題を解決するための手段】 本発明の窒化ガリウム系化合物半導体の結晶成長方法は、反応容器内に反応ガスを供給し、低温で成長させるバッファ層の上に、高温で成長させる窒化ガリウム系化合物半導体の結晶を成長させる方法であって、前記バッファ層の一般式が $Ga_{1-x}Al_xN$ で表されることを特徴とするものである。但し x は $0 < x \leq 1$ の範囲に特定される。

【0009】 前記バッファ層の厚さは $0.002\mu m$ 以上、 $0.5\mu m$ 以下、さらに好ましくは $0.01 \sim 0.2\mu m$ の範囲に調整する。その厚さが $0.02\mu m$ より薄く、また、 $0.5\mu m$ より厚いと、バッファ層の上に形成する窒化ガリウム系化合物半導体の結晶の表面モフォロジーが悪くなる傾向にある。

【0010】 また前記バッファ層の成長温度は $200^\circ C$ 以上 $900^\circ C$ 以下、好ましくは $400 \sim 800^\circ C$ の範囲

に調整する。200℃より低いと、バッファ層が形成しにくく、また900℃より高いと、バッファ層が単結晶となってしまう、以下に述べるバッファ層としての作用を果たさなくなる傾向にある。

【0011】

【作用】図1に $Ga_{1-x}Al_xN$ ($0 < x \leq 1$) をバッファ層として、その上に窒化ガリウム系化合物半導体の結晶を成長させた場合のエピタキシャルウエハーの構造を表す断面図を示し、図2にAlNをバッファ層として、同じくその上に同じく結晶を成長させた場合の、エ

ピタキシャルウエハーの構造を表す断面図を示す。本発明のバッファ層は従来のバッファ層に比べて、厚さの許容範囲が大きいと、歩留良くバッファ層および窒化ガリウム系化合物半導体結晶が成長できる。

【0012】ところでAlNをバッファ層として窒化ガリウム系化合物半導体の結晶を成長させる方法はThin Solid Films. 163, (1988), 415 (ツイン ソリッド フィルムズ 163巻、1988年、415頁)、およびAppl. Phys. Lett. 48, (1986), 353 (アプライド フィジックス レターズ 48巻、1986年、353頁)等に詳しく述べられているが、それらの文献に記載されているバッファ層の作用を簡単に述べると以下の内容である。

【0013】低温(約600℃)で成長させるAlNは多結晶層であり、この層が、例えばGaNを成長させるために約1000℃にまで温度を上げる際、層が部分的に単結晶化する。部分的に単結晶化した部分が、1000℃でGaNを成長させる時に方位の揃った種結晶となり、その種結晶からGaN結晶が成長し、均一なGaN単結晶層が成長できる。バッファ層がないときはサファイア基板自身が種結晶となるため、方位が大きくばらついたGaNの六角柱の結晶が成長してしまうという内容である。

【0014】本発明のように $Ga_{1-x}Al_xN$ ($0 < x \leq 1$) をバッファ層として形成した場合を従来のAlNをバッファ層とした場合と比較すると以下のように考えると考えられる。

【0015】まずバッファ層として、例えば $x=1$ のGaNを形成する場合を考えると、GaNの融点は1100℃であり、AlNの融点は1700℃である。このため600℃でGaNのバッファ層を形成すると、バッファ層は多結晶の層が成長する。次にこの多結晶のGaNバッファ層の上にGaNのエピタキシャル層を成長するために1000℃まで温度を上げると、GaNのバッファ層は部分的に単結晶化し、AlNをバッファ層とした場合と同様に、GaNエピタキシャル層用の種結晶として作用することになる。

【0016】しかもAlNをバッファ層として形成した場合よりも、

① 融点が低いので温度を上昇しているときに容易に単

結晶化しやすい。このため、バッファ層の厚さを、厚くしてもバッファ層としての効果が期待できる。

② バッファ層がGaNなので、その上にGaNのエピタキシャル層を成長する場合、同一材料の上に同一材料を成長するため結晶性の向上が期待できる。等の利点があると考えられる。

【0017】以上のことを確認するため、AlN、 $Ga_{0.5}Al_{0.5}N$ 、GaNの3種類のバッファ層を600℃でそれぞれサファイア基板上に形成し、その上に1000℃でGaNエピタキシャル層を4μmの厚さで成長した場合の、GaNエピタキシャル層のダブルクリスタルX線ロッギングロッギングカーブの半値巾(FWHM: full width at half-maximum)とバッファ層の膜厚との関係を求めた図を図3に表す。FWHMは小さいほど結晶性がよい。

【0018】図3に示すようにGaNをバッファ層として形成した方が、広いバッファ層の膜厚範囲で結晶性がよく、 $Ga_{0.5}Al_{0.5}N$ はその中間に位置し、上記考察どおりの効果があることが判明した。

【0019】図4～図7に、サファイア基板上に形成するGaNバッファ層の膜厚を変え、さらにその上にGaNのエピタキシャル層を4μm成長させた場合の、GaNエピタキシャル層の表面の構造を表す顕微鏡写真図を示す。図4から図7まで順に、バッファ層厚さは0.002μm、0.007μm、0.020μm、0μm(バッファ層無し)である。

【0020】これらの図を見ても分かるように、バッファ層がない場合は、表面に六角柱状の結晶が現れる。バッファ層を形成する際の条件にもよるが、バッファ層を形成するにしたがって表面が鏡面均一になる傾向がある。しかしバッファ層が厚すぎると、表面の状態(表面モフォロジー)が悪くなる傾向にある。したがって好ましいバッファ層の厚さは0.01μmから0.2μmの間である。

【0021】また本発明の結晶成長方法によるバッファ層は、サファイア基板上だけでなく窒化ガリウム系化合物半導体のエピタキシャル層を有する層であれば、どの層に形成してもよい。例えばn型GaNエピタキシャル層の上に、p型不純物であるMgがドーピングされたp型GaNのエピタキシャル層を形成したい場合、前記n型GaNエピタキシャル層の上にバッファ層を形成し、そのバッファ層の上にp型GaNエピタキシャル層を成長させることもできる。

【0022】

【実施例】以下、本発明の実施例を説明する。但し以下に示す実施例は、本発明の技術思想を具体化するための方法を例示するものであって、本発明の方法は成長条件、有機金属化合物ガスの種類、使用材料等を下記のものに特定するものではない。この発明の成長方法は、特許請求の範囲において種々の変更を加えることができ

5

る。

【0023】図8に示す装置を用いて窒化ガリウム系化合物半導体の結晶成長を行った。

【実施例1】下記の工程でサファイア基板にGa_{0.5}Al_{0.5}Nのエピタキシャル層を4μmの膜厚で成長させた。

① 洗浄された2インチφのサファイア基板をサセプター2の上に載せる。

② ステンレス製の反応容器1内の空気を、排気ポンプ6で排気した後、さらに内部をH₂で置換する。

③ その後、H₂ガスを反応ガス噴射管4と、反応容器1上部の副噴射管5とから、反応容器1内に供給しながら、サセプター2をヒータ3によって1060℃まで加熱する。

④ この状態を10分間保持し、サファイア基板表面の酸化膜を除去する。

⑤ 次にサセプター2の温度を500℃まで下げて、温度が安定するまで静置する。

⑥ 続いて副噴射管5からH₂とN₂の混合ガスを供給し、反応ガス噴射管4からアンモニアガスとH₂ガスの混合ガスを供給する。副噴射管5から供給するH₂ガスとN₂ガスの流量はそれぞれ10リットル/分、反応ガス噴射管4から供給するアンモニアガスの流量は4リットル/分、H₂ガスの流量は1リットル/分とし、この状態でサセプター2の温度が500℃に安定するまで待つ。

⑦ その後、バッファ層を形成するため、反応ガス噴射管4からアンモニアガスとH₂ガスに加えて、TMG（トリメチルガリウム）ガスを2.7×10⁻⁵モル/分で1分間流す。

⑧ 次にTMGガスのみを止めて、バッファ層の成長を止める。ここで膜厚0.02μmのバッファ層が形成できた。さらに他のガスは流しながらサセプター2の温度を1000℃まで上昇させる。

⑨ サセプター2の温度が1020℃まで上昇した後、反応ガス噴射管4からアンモニアガスとH₂ガスに加えて、TMGガスを5.4×10⁻⁵モル/分の流量で60分間供給して、Ga_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層を、4.0μmの膜厚で成長させる。この間、副噴射管5から常にH₂とN₂ガスを前述の条件で供給し続け、反応ガスで反応容器内が汚染されないようにしている。またサセプター2は均一に結晶が成長するように、モータ7で5rpmで回転させる。なお当然のことではあるが、ガスを供給している間、排気ポンプ6の配管と分岐した排気管8から、供給しているガスを外部へ放出している。上記のようにしてサファイア基板上に、膜厚0.02μmのGa_{0.5}Al_{0.5}Nバッファ層、その上に4μmのGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層を成長させた。

【0024】【比較例1】⑦のバッファ層を形成する工程において、Al_{0.5}Nのバッファ層を0.02μmの膜厚で形成する以外は、実施例1と同様にしてAl_{0.5}Nバッ

6

ファ層の上に4μmのGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層を成長させた。なおAl_{0.5}Nバッファ層を形成する際、⑦において、反応ガス噴射管4からアンモニアガスとH₂ガスに加えて、TMA（トリメチルアルミニウム）を2.7×10⁻⁵モル/分で1分間流した。

【0025】成長後ホール測定を室温で行い、本発明によるGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層と、比較例1によるGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層の、キャリア濃度と移動度とをそれぞれ求め、その結果による、キャリア濃度、および移動度の面内分布を表す図を、図9および図10に示す。本発明は図9、比較例は図10、キャリア濃度は○、移動度は◇で示している。

【0026】ノンドープの結晶を成長した場合はキャリア濃度が小さく、しかも移動度が大きい程、結晶性が良くまた不純物濃度が小さいことを表す。

【0027】本発明によるGa_{0.5}Al_{0.5}Nは、キャリア濃度が4×10¹⁸/cm³、移動度600cm²/V·secと非常によい値を示す。一方、Al_{0.5}Nをバッファ層とした比較例1は、キャリア濃度が1×10¹⁸/cm³、および移動度が約90cm²/V·secであった。

【0028】【実施例2】⑦のバッファ層を形成する工程において、Ga_{0.5}Al_{0.5}Nのバッファ層を0.02μmの膜厚で形成する以外は、実施例1と同様にしてバッファ層の上にGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層を成長した。なおバッファ層を形成する際、反応ガス噴射管4からアンモニアガスと、H₂ガスに加えて、TMGを2.7×10⁻⁵モル/分、TMAを2.7×10⁻⁵モル/分でそれぞれ0.5分間流した。このGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層も図3に示すように、優れたX線ロッキングカーブを示し、また顕微鏡観察による表面モフォロジーは実施例1と同等、キャリア濃度および移動度は、実施例1と比較例1との中間に位置するものであった。

【0029】【実施例3】⑥においてバッファ層の成長温度を600℃とし、⑦のガス流時間を2.5分間に変えて、バッファ層の膜厚を0.05μmとする他は、実施例1と同様にしてGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層を成長した。このGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層も表面モフォロジーは実施例1と同等、X線ロッキングカーブの半値巾は3分と優れた結晶性を示し、キャリア濃度、移動度とも実施例1と同等であった。

【0030】【実施例4】⑥においてバッファ層の成長温度を800℃とする他は、実施例1と同様にしてGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層を成長した。このGa_{0.5}Al_{0.5}Nエピタキシャル層も表面モフォロジーは実施例1と同等、X線ロッキングカーブの半値巾は3分と優れた結晶性を示し、キャリア濃度、移動度とも実施例1と同等であった。

【0031】【実施例5】⑦のバッファ層を形成する工程において、実施例2と同様の条件で、Ga_{0.5}Al_{0.5}Nのバッファ層を0.02μmの膜厚で形成し、⑨において、反応ガス噴射管4からアンモニアガスとH₂

ガスに加えて、TMAガスを 2.7×10^{-5} モル/分、TMGガスを 2.7×10^{-5} モル/分の流量で60分間供給して、 $Ga_{0.5}Al_{0.5}N$ エピタキシャル層を $4.0 \mu m$ の膜厚で成長させる他は、実施例1と同様にして、サファイア基板上に、膜厚 $0.02 \mu m$ の $Ga_{0.5}Al_{0.5}N$ バッファ層と、その上に $4 \mu m$ の $Ga_{0.5}Al_{0.5}N$ エピタキシャル層を成長させた。この $Ga_{0.5}Al_{0.5}N$ エピタキシャル層も、表面モフォロジーは実施例1と同等であった。

【0032】[実施例6] ⑨において、アンモニアガス、 H_2 ガス、およびTMGガスに加えて、 Cp_2Mg （ビスシクロペンタジエニルマグネシウム）ガスを流しながら、 GaN エピタキシャル層にp型の不純物であるMgをドーピングして、p型 GaN エピタキシャル層を $4.0 \mu m$ の膜厚で成長させた。上記のようにしてサファイア基板上に、膜厚 $0.02 \mu m$ の GaN バッファ層、その上にMgを $10^{20}/cm^3$ ドーピングした膜厚 $4.0 \mu m$ のp型 GaN エピタキシャル層を成長させた。このp型 GaN エピタキシャル層も、表面モフォロジーは実施例1と同等であり、キャリア濃度 $2.0 \times 10^{15}/cm^3$ 、移動度 $9.4 cm^2/V \cdot sec$ と窒化ガリウム系化合物半導体では、初めてp型特性を示した。このことはこのエピタキシャル膜の結晶性が非常に優れていることを示している。

【0033】[実施例7] 実施例1で得た膜厚 $4 \mu m$ の GaN エピタキシャル層の上に、実施例6と同様にして、膜厚 $0.02 \mu m$ の GaN バッファ層、その上にMgを $10^{20}/cm^3$ ドーピングした膜厚 $4.0 \mu m$ のp型 GaN エピタキシャル層を成長させた。このp型 GaN エピタキシャル層も、表面モフォロジーは実施例1と同等であり、キャリア濃度 $3.5 \times 10^{15}/cm^3$ 、移動度 $8.5 cm^2/V \cdot sec$ と同じくp型特性を示した。

【0034】[実施例8] ⑨において、アンモニアガス、 H_2 ガス、およびTMGガスに加えて、シラン（ SiH_4 ）ガスを流しながら、 GaN エピタキシャル層にn型の不純物であるSiをドーピングして、 $4.0 \mu m$ の膜厚で成長させた。上記のようにしてサファイア基板上に、膜厚 $0.02 \mu m$ の GaN バッファ層、その上に、Siを約 $10^{20}/cm^3$ ドーピングした膜厚 $4 \mu m$ のn型 GaN エピタキシャル層を成長させた。このn型 GaN エピタキシャル層も、表面モフォロジーは実施例1と同等であり、キャリア濃度 $1.0 \times 10^{19}/cm^3$ と非常に高いキャリア濃度を示した。

【0035】[比較例2] AlN のバッファ層を $0.02 \mu m$ の膜厚で形成する以外は、実施例8と同様にSiをドーピングして、サファイア基板上に形成した AlN バッファ層の上に、さらに $4 \mu m$ のn型 GaN エピタキシャル層を成長させた。このn型 GaN エピタキシャル層は、キャリア濃度が $5.0 \times 10^{18}/cm^3$ であり、比較例1程のキャリア濃度は得られず、不純物により補償さ

れて低くなっていると考えられる。

【0036】

【発明の効果】以上説明したように、 $Ga_{1-x}Al_xN$ （ $0 < x \leq 1$ ）をバッファ層に形成することによって、その上に成長させる窒化ガリウム系化合物半導体の結晶性が、飛躍的に向上する。例えば、結晶のホール測定において、移動度 $600 cm^2/V \cdot sec$ という値は、窒化ガリウム系化合物半導体結晶では最も優れた値である。さらにバッファ層を形成することによって、その上に成長させるMgをドーピングした GaN エピタキシャル層が、何の処理も無しにp型を示す。これは全く初めてのことであり、本発明の方法で成長させた窒化ガリウム系化合物半導体の結晶性がいかに優れているかを示すものである。またそのバッファ層上に成長させるSiをドーピングしたn型 GaN も、 AlN をバッファ層としたものに比較して、非常に高いキャリア濃度を示す。さらにまた、従来の AlN バッファ層に比べて、本発明のバッファ層を成長するための条件が緩やかである。すなわち広いバッファ層の厚みの範囲で、その上に成長させる窒化ガリウム系化合物半導体層の結晶性がよい。このため発光素子を形成する際の量産性に優れている。このように本発明の技術を用いることにより、窒化ガリウム系化合物半導体の結晶を利用して、青色発光ダイオードはもちろんのこと、半導体レーザーまで、実用化に向けてその用途は非常に大きいものがある。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の結晶成長方法によるエピタキシャルウエハーの構造を表す概略断面図。

【図2】 従来の結晶成長方法によるエピタキシャルウエハーの構造を表す概略断面図。

【図3】 GaN エピタキシャル層のダブルクリスタルX線ロックンギングカーブの半値巾（FWHM）と、バッファ層の膜厚との関係を表す図。

【図4】 GaN エピタキシャル層の結晶の構造を表す顕微鏡写真図。

【図5】 GaN エピタキシャル層の結晶の構造を表す顕微鏡写真図。

【図6】 GaN エピタキシャル層の結晶の構造を表す顕微鏡写真図。

【図7】 GaN エピタキシャル層の結晶の構造を表す顕微鏡写真図。

【図8】 本発明に使用した装置の部分概略断面図。

【図9】 本発明による GaN 結晶のホール測定結果による、キャリアー濃度、および移動度の面内分布を表す図。

【図10】 従来法による GaN 結晶のホール測定結果による、キャリアー濃度、および移動度の面内分布を表す図。

【符号の説明】

1・・・反応容器

- 2・・・サセプター
3・・・ヒータ
4・・・反応ガス噴射管
5・・・副噴射管

- 6・・・排気ポンプ
7・・・モーター
8・・・排気管

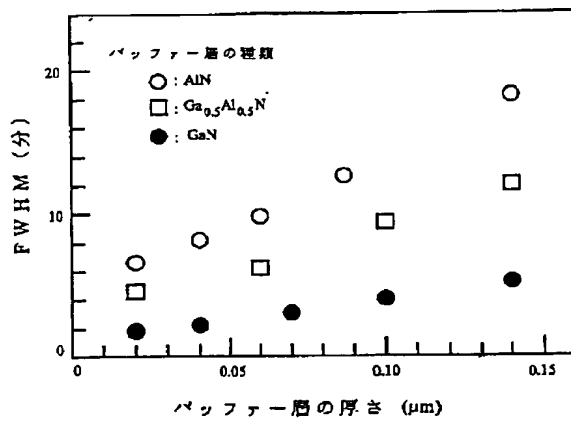
【図1】

$Ga_xAl_{1-x}N$ 結晶	$(0 \leq x \leq 1)$
バッファ層 $Ga_xAl_{1-x}N$	$(0 < x \leq 1)$
サファイア基板	

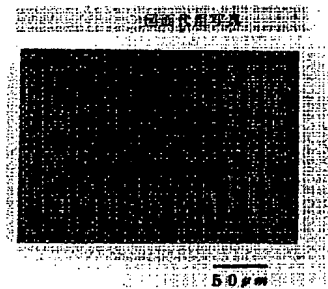
【図2】

$Ga_xAl_{1-x}N$ 結晶	$(0 \leq x \leq 1)$
AINバッファ層	
サファイア基板	

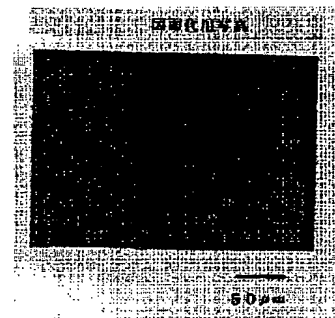
【図3】



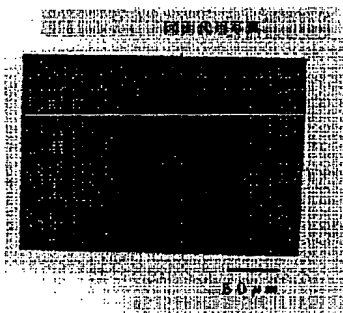
【図4】



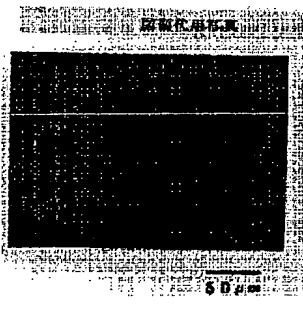
【図7】



【図5】

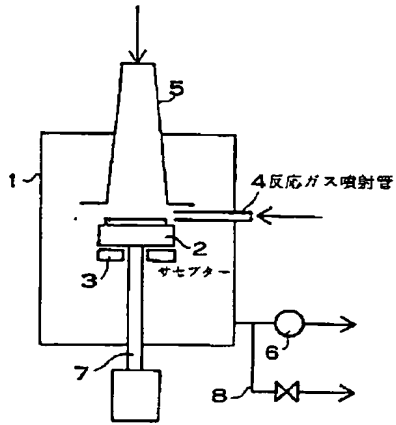


【図6】

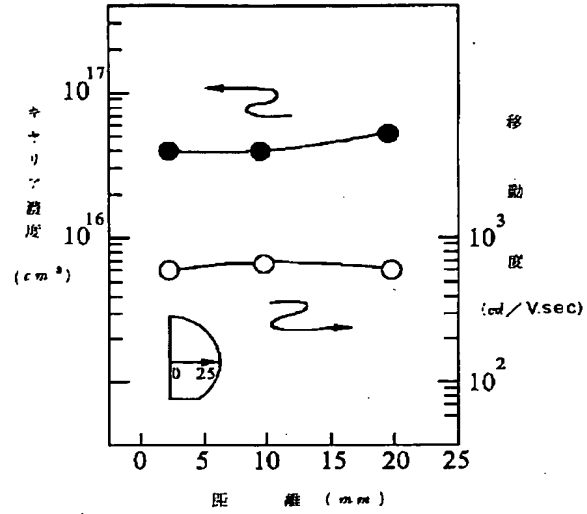


BEST AVAILABLE COPY

【図8】



【図9】



【図10】

